第48卷 第2期
2025年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 48 No. 2
Feb. 2025

CMA-MESO模式暖季小时及日降水预报性能评估
——以伊犁河谷为例

牟 欢[1], 陈春艳[1], 杨 霞[1], 赵 丽[2]

(1. 新疆维吾尔自治区气象台,新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 新疆信息工程学校,新疆 乌鲁木齐 830013)

摘 要: 定量降水预报性能评估可以为降水预报释用和改进提供科学依据。利用2022—2023年5—9月(暖季)小时站点降水观测和CMA-MESO模式降水预报数据,采用晴雨准确率、成功指数(Threat score,TS)、空报率和漏报率等评估指标,对伊犁河谷降水预报性能进行深入研究。结果表明:(1) CMA-MESO模式能合理刻画出伊犁河谷暖季1 h和24 h降水特征。随降水强等级的增大,降水预报和观测频率均呈下降趋势。(2) 模式预报不同强度降水的TS评分与降水预报的累积概率偏差密切相关。6.1~12.0 mm的24 h降水预报TS评分最低,其累积概率预报偏差最高,均值超过2.0%;1 h预报TS评分随着降水强度的增强显著下降,偏差在0.1 mm时达峰值1.7%。(3) 预报与观测降水频率均随海拔呈增长趋势,但24 h预报频率在不同高度均为负偏差,而1 h预报频率在低海拔区为正偏差,亚高海拔区为负偏差。(4) 日变化方面,CMA-MESO模式没有准确模拟出伊犁河谷降水频率昼少夜多的特征。具体而言,模式对白天降水空报偏多,而对夜间降水漏报偏多,预报偏差在中午13:00—14:00和凌晨02:00—05:00最显著。

关 键 词: CMA-MESO; 降水评估; 暖季; 小时及日降水; 伊犁河谷

文章编号: 1000-6060(2025)02-0179-11(0179~0189)

伊犁河谷是位于亚欧大陆中心地带的独特地理单元,因其复杂的地形地貌而著称。尽管该河谷地处内陆干旱半干旱气候带,但其丰富水资源对于推动当地农牧业发展、水资源的可持续管理和生态多样性的保护起着至关重要的作用[1]。然而,频繁的降水事件同时又给这一地质环境脆弱的区域构成了严峻挑战[2-3],使得伊犁河谷成为滑坡、泥石流等地质灾害的易发区[4-6]。伊犁河谷的年降水量和降水频率在新疆境内极为突出,尤其是暖季降水占比极大[7-8],该降水特征与当地复杂地形条件密切相关。伊犁河谷自西向东呈由宽及窄的变化,海拔高度也逐渐上升。这种特殊的地形能引发降水,更能显著增强和改变降雨的分布,但同时增加了降水预报的不确定性[9-10]。数值模式在模拟降水事件时,呈现出明显的日变化特征和地域性差异[11]。

近几年,区域高分辨率数值模式在复杂地形下的降水预报方面发挥着独特优势[12]。CMA-MESO是中国气象局开发的一种针对中国及其周边地区中尺度数值预报系统[13-14]。相比于全球数值预报模式,CMA-MESO模式能更准确地刻画局部环流和地形强迫的过程[15],在灾害性天气预警方面发挥着至关重要的作用。然而,由于初始场偏差及参数化方案不同等因素影响,导致降水特征存在显著的时空分布差异[16]。因此,数值预报的检验评估工作成为改进数值预报系统和数值预报释用中的重要环节[17-18]。基于站点观测值的经典检验方法主要分为数值偏差检验和频率统计检验[19-20],其中,数值偏差检验侧重于评估站点观测实况与定量降水预报

收稿日期: 2024-06-05; **修订日期:** 2024-07-15

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01A292);高寒山区致洪雨雪冰事件源头风险识别与动态监测预报(2022B03021-1);天山英才培养计划(2023TSYCCX0077)资助

作者简介: 牟欢(1982-),男,高级工程师,主要从事短期模式预报客观订正技术业务与研究. E-mail: mouh198209@foxmail.com

通讯作者: 陈春艳(1969-),女,正高级工程师,主要从事新疆灾害性强对流天气研究. E-mail: chency357@sina.com

数值的一致性，涉及的评估指标包括均方根误差、平均绝对误差、平均误差等；而频率统计检验则基于测站统计观测实况与预测事件发生的次数，评估指标有晴雨预报准确率（Probability of correctness，PC）、成功指数（Threat score，TS）、空报率（False alarm rate，FAR）、漏报率（Missed alarm rate，MAR）等。此外，研究人员还根据我国降水气候特征提出一些新的评估指标。例如，陈静等[21]创建了一种新型的暴雨可预报性综合指数，基于暴雨的发生频率、面积占比和数值模式预报TS评分等方面，详细阐述了中国不同区域的暴雨可预报性。曹越等[22]提出了描述降水集中度的R指数，并对比检验了欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，ECMWF）高分辨率模式（ECMWF-Hi）和ECMWF集合预报模式（ECMWF-EPS）的24 h降水预报产品，结果表明，ECMWF-Hi的降水预报更接近实况值，二者的预报集中度大于实况值。众多研究结果表明，尽管CMA-MESO模式可以更好的表达对流天气过程，但在不同的季节、区域和时段的降水预报偏差特征有所不同[23-24]，针对性的改进可以有效提升预报准确率[25-27]。

CMA-MESO模式引入了更加精确的模拟方案和初始数据，但关于其在干旱区降水预报性能的研究仍然较少[28-29]。本研究基于区域气象观测站和CMA-MESO模式预报降水数据，采用天气预报业务中常用的评估指标和诊断方法，深入分析模式在24 h和1 h时间尺度下降水预报频率的准确性，并探讨降水预报偏差的日变化特征及与复杂地形的关系。研究结果可以为复杂地形下的模式预报性能改进和防灾减灾工作提供精确的科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本研究聚焦的伊犁河谷（42.8°~44.8°N，78.0°~85.0°E）位于中国天山山脉的西端，西部与哈萨克斯坦共和国接壤，在南北天山山脉的夹持作用下，形成了“三山夹两谷”的地貌特征。伊犁河谷的地形结构尤为独特，其河谷地带在南天山山脉（西南—东北走向）和北天山山脉（西北—东南走向）的环抱中，形成了一个向西敞开的喇叭口状谷地。这种地形结构对当地的气候产生了显著影响，当来自南方和北方的湿润气流通过河谷西端进入时，受到谷地辐合抬升作用的影响，易于引发持续性降水以及局部短时强降水天气过程[30]。尽管伊犁河谷地处半干旱气候区域，却因独特的地理位置而享有丰富的降水。值得注意的是，暖季在全年降水分布中占据了显著的比例，其降水量和降水时数分别占据了大约69%和60%。根据中国陆地基本地貌划分指标[31]，将伊犁河谷160个气象观测站分为低海拔区（1000 m以下）、中海拔区（1000~2000 m）和亚高海拔区（2000~4000 m）。从图1可以看出，亚高海拔区和中海拔区的暖季降水较低海拔区显著偏多。大部分亚高海拔和中海拔测站的暖季降水超过400 mm[32]，因而被誉为“中亚绿洲”和“塞外江南”，进一步凸显了其气候特征上的独特性。这种独特的地理位置和气候特征，使得该区域成为一个极富挑战性的数值预报研究场所。

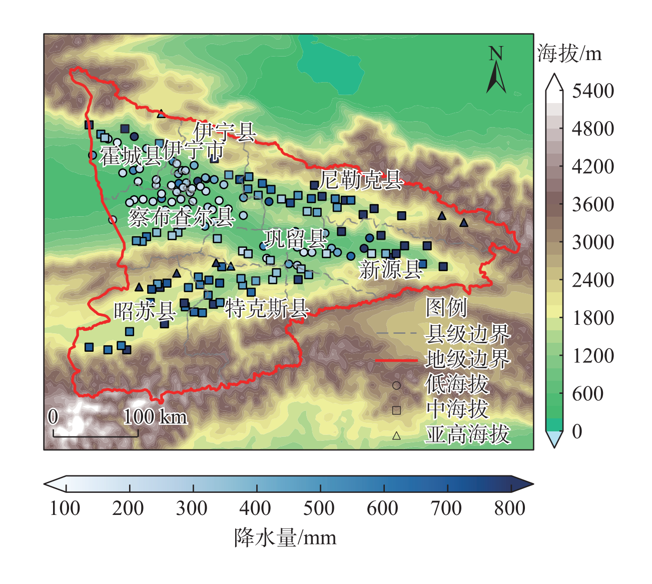


图1 伊犁河谷气象观测站暖季降水的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of warm season precipitation at the meteorological observation stations in the Ili River Valley

1.2 数据来源与处理

本研究采用了2022—2023年暖季（5—9月）伊犁河谷160个气象观测站的逐小时降水观测资料。这些观测数据来自新疆气象局信息中心，并经过质量控制处理。同时，本研究还使用了中国气象局信息中心提供的CMA-MESO数值预报模式产品。该产品包含了降水量等多种气象要素，时间分辨率为1 h，水平空间分辨率为3 km×3 km，起报时间为每日20:00。为了与国家气象中心的业务检验标准保持

一致，研究采用了临近点匹配法进行数值模式预报的检验。此外，考虑到数值模式产品在实际预报业务中的应用，本研究重点关注了12~36 h的预报时效。文中地图是基于新疆维吾尔自治区地理信息公共服务平台下载的审图号为新S(2021)142号的标准地图制作，底图边界无修改。

1.3 降水等级划分

伊犁河谷地处干旱半干旱地区，其年降水量和降水频率都低于中国大部分地区。因此，全国统一的降水等级划分标准并不适用于该地区。本研究采用了新疆现行的降水业务规范[33]作为24 h降水强度标准，但该标准中并未涉及1 h降水强度的划分。为了更全面地评估降水预报性能，本研究参考了降水检验业务标准和新疆暖季小时降水样本的百分位数[34]对降水强度等级进行了如下划分，具体标准见表1。

表1 新疆降水强度等级标准

Tab. 1 Grade standards of precipitation intensity in Xinjiang /mm

时效/h	累计降水量(R)			
1	0.1≤R<2.0	2.0≤R<5.0	5.0≤R<10.0	10.0≤R
24	0.1≤R<6.1	6.1≤R<12.1	12.1≤R<24.1	24.1≤R

此外，为了更好地满足实际预报业务的需求，本研究还将降水强度划分为"有效降水"和"强降水"两大类。当1 h或24 h累计降水量达到或超过0.1 mm时，即定义为有效降水；当1 h降水量≥5.0 mm和24 h累计降水量≥12.1 mm时，则定义为强降水。

1.4 降水统计和检验方法

本研究采用测站检验方式对模型降水预报性能进行分类统计检验。具体检验公式如下：

$$\mathrm{TS}=\frac{\mathrm{NA}}{\mathrm{NA}+\mathrm{NB}+\mathrm{NC}}\times 100\% \quad (1)$$

$$\mathrm{FAR}=\frac{\mathrm{NB}}{\mathrm{NA}+\mathrm{NB}}\times 100\% \quad (2)$$

$$\mathrm{MAR}=\frac{\mathrm{NC}}{\mathrm{NA}+\mathrm{NC}}\times 100\% \quad (3)$$

$$\mathrm{PC}=\frac{\mathrm{NA}+\mathrm{ND}}{\mathrm{NA}+\mathrm{NB}+\mathrm{NC}+\mathrm{ND}}\times 100\% \quad (4)$$

$$r_i=\frac{f_i-o_i}{o_i}\times 100\% \quad (5)$$

$$B_n=\left|\mathrm{FC}_n-\mathrm{OC}_n\right| \quad (6)$$

式中：TS为一种用于反映有效降水预报准确率的评估指标；FAR为降水空报率；MAR为降水漏报率；PC为用于反映预报准确率的评估指标；NA为有降水且预报正确次数；NB为空报次数；NC为漏报次数；ND为无降水且预报正确次数；r_i为降水预报偏差率，表示预报与观测频率偏差比的绝对值；f_i为降水预报频率；o_i为降水观测频率；i为降水强度等级。若f_i-o_i>0时为正偏差，表示降水预报频率高于观测频率；f_i-o_i<0时为负偏差，表示降水预报频率低于观测频率。B_n为降水预报频率累积偏差，用于分析不同强度降水的预报频率累积偏差程度；FC为预报降水频率的累积概率分布；OC为观测降水频率的累积概率分布；n为降水量阈值。

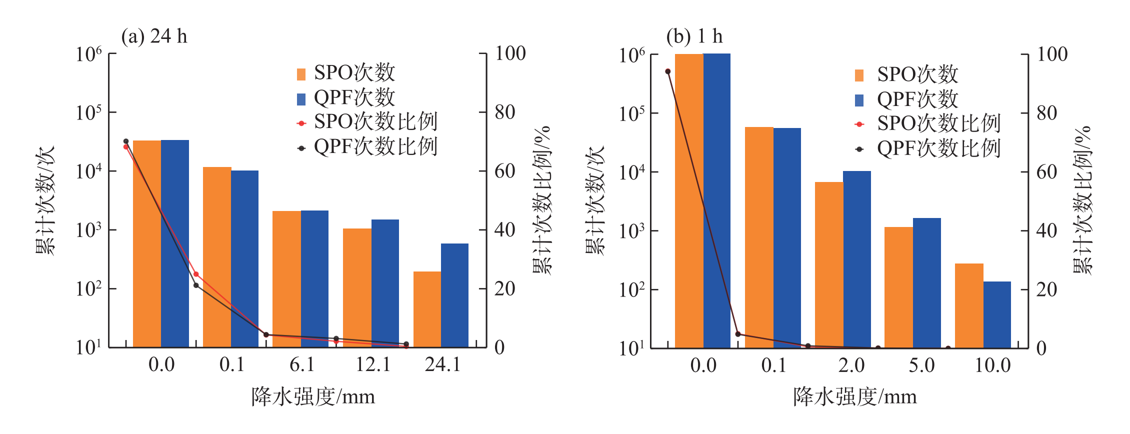
2 结果与分析

2.1 不同强度降水的预报频率偏差

对比暖季不同强度降水累计次数和比例可知(图2)，24 h降水方面，各强度降水(从弱到强，下同)观测次数比例分别为25.0%、4.3%、2.1%和0.4%，降水预报次数比例分别为21.2%、4.4%、3.1%和1.2%，预报偏差率分别为-15.2%、2.3%、45.1%和205.0%；1 h降水方面，各强度降水观测次数的比例分别为5.0%、0.6%、0.1%和0.02%，降水预报次数比例分别为4.82%、0.91%、0.14%和0.01%，预报偏差率分别为-3.6%、56.9%、40.0%和-50.0%。综上分析，CMA-MESO模式对24 h累计降水0~12.0 mm和1 h降水0~1.9 mm预报偏差率绝对值相对较小，而24 h强降水和1 h降水量≥2.0 mm的预报偏差率显著偏大。偏差率大的降水强度是由于降水事件比例不足1%，极少的降水事件会限制同化数据的质量，进而影响数值模式的模拟能力，这是强降水在干旱区域预报难度大的重要原因之一[35]。

2.2 不同强度降水预报性能

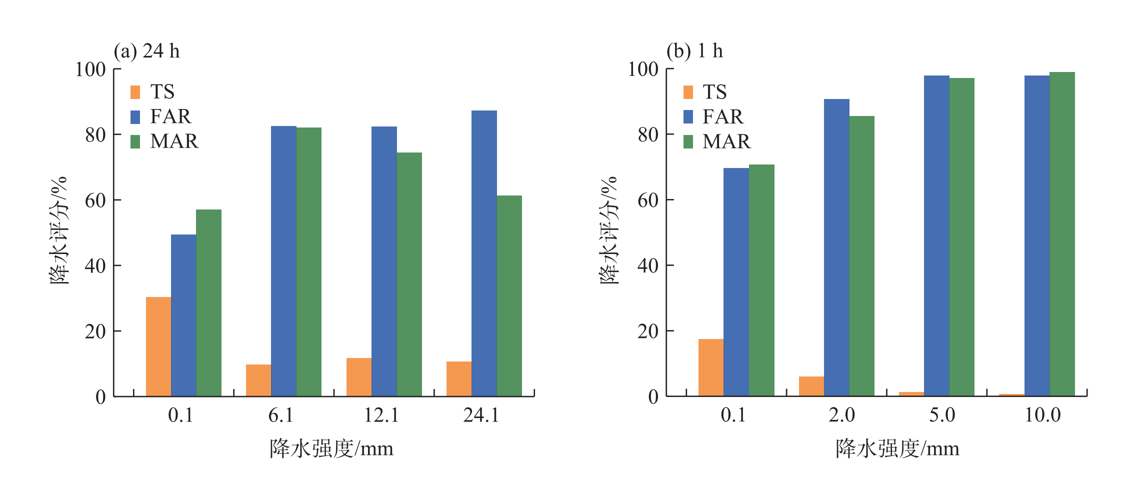
TS、FAR和MAR评分是用于评估降水频率预报性能的常用指标。24 h预报评分看(图3a)，各强度降水的TS评分分别为30%、10%、12%和11%，其中，0.1~6.0 mm降水的TS最高，而6.1~12.0 mm降水的TS最低。此外，模式预报≥6.1 mm降水的FAR维持在82%以上，但6.1 mm以上降水的MAR随着降水增强而减少。1 h预报评分看(图3b)，随着降水强度增强，各强度降水的TS评分显著下降，分别为17%、6%、3%和1%，而FAR和MAR逐渐上升，特别是强降水预报的FAR和MAR均在97%以上。CMA-



注：SPO为站点观测；QPF为模式预报。下同。

图2 不同强度降水累计次数和比例

Fig. 2 Accumulated counts and proportions of precipitation with different intensities



注：TS为一种用于反映有效降水预报准确率的评估指标；FAR为降水空报率；MAR为降水漏报率。下同。

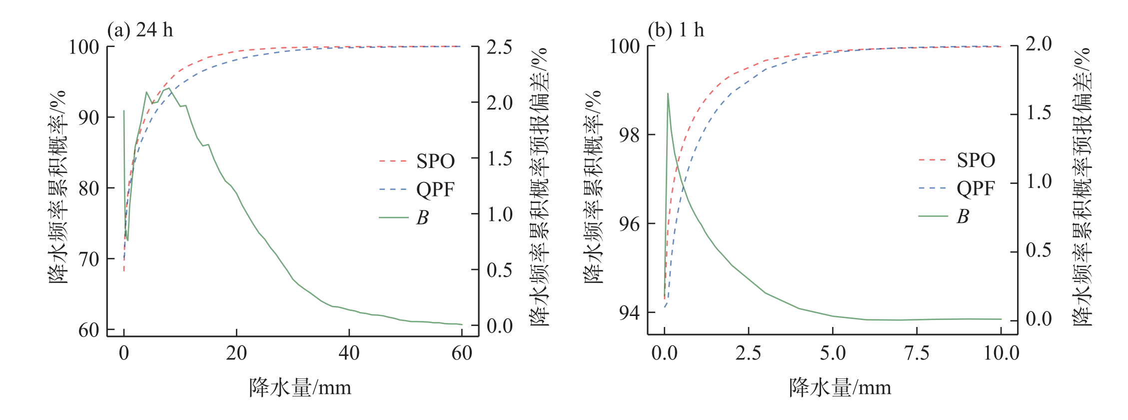
图3 不同强度降水预报评分

Fig. 3 Precipitation forecast scoring for different intensities

MESO模式对不同强度降水预报评分为何呈现这种特征呢？利用累积概率分布函数可以进一步了解数值模式降水预报频率的偏差特征。由降水预报频率累积偏差分布可知，24 h降水的累积偏差分布（图4a）呈现出倒“N”形的双峰结构。在无降水时，累积偏差达到了第一个峰值，约为1.9%，第二个峰值出现在8 mm处，偏差约2.1%。模式对6.1~12.0 mm降水预报的平均累积偏差超过2%，而该强度降水的观测频率仅占4.3%，偏差显著高于其他强度降水，故导致预报准确率最低。1 h降水累积偏差分布（图4b）呈倒“V”型，峰值出现在降水为0.1 mm时，偏差约为1.7%。此外，在0~5 mm的区间内，降水预报累积概率低于观测。由此可知，1 h降水预报累积概率分布及偏差变化趋势比24 h的预报更加一致，这有利于降低预报订正工作的难度，并有效提升预报准确率。

2.3 不同海拔降水预报性能

2.3.1 不同海拔降水频率分布 多种评分指标可以从不同角度深入探讨模式预报性能、偏差特征及关键影响因素。由表2可知，亚高海拔区、中海拔区和低海拔区观测站数为7个、83个和70个，其中，中海拔区和低海拔区测站比例为95%。从24 h降水看，亚高海拔区、中海拔区和低海拔区测站的降水观测频率为0.49次·d^{-1}、0.37次·d^{-1}和0.24次·d^{-1}，预报频率为0.48次·d^{-1}、0.34次·d^{-1}和0.22次·d^{-1}；1 h降水方面，亚高海拔区、中海拔区和低海拔区测站的降水观测频率为0.11次·h^{-1}、0.07次·h^{-1}和0.04次·h^{-1}，预报频率为0.09次·h^{-1}、0.07次·h^{-1}和0.05次·h^{-1}。综上所述，随海拔的增高，降水观测和预报频率均呈增大趋势，且预报频率偏差较小，这表明CMA-ME-



注：B为降水预报频率累积偏差。

图4　降水频率累积概率及累积概率预报偏差分布

Fig. 4　Distributions of accumulated precipitation frequency probability and forecast bias for accumulated precipitation frequency probability

表2　2022—2023年暖季伊犁河谷观测站数、降水观测和预报频率在不同海拔的分布

Tab. 2　Distribution of observation station counts, precipitation observation and forecast frequencies at different elevations in the Ili River Valley during the warm season from 2022 to 2023

海拔(H)/m	观测站数/个	24 h观测频率/次·d^{-1}	24 h预报频率/次·d^{-1}	1 h观测频率/次·h^{-1}	1 h预报频率/次·h^{-1}
2000≤H	7	0.49	0.48	0.11	0.09
1000≤H<2000	83	0.37	0.34	0.07	0.07
H<1000	70	0.24	0.22	0.04	0.05

SO模式能够准确模拟降水随海拔的变化趋势。对比不同海拔下降水预报的偏差可知，24 h降水预报频率均低于观测；但模式的1 h降水预报频率，在低海拔区为正偏差，而在亚高海拔区为负偏差。

由降水预报频率偏差的空间分布可知(图5)，24 h降水预报频率主要为负偏差；而1 h预报频率在低海拔区为正偏差，亚高海拔区为负偏差，且24 h和1 h的预报偏差在亚高海拔区更为显著。相比于CMA-MESO在云贵高原的预报，降水频率为正偏差，显著偏差主要在1500 m以下地区，这可能是CMA-MESO模式对复杂地形下局地中小尺度天气及云微物理过程的模拟不够精准造成的[36]。

2.3.2　不同海拔降水预报评分　多种评分指标可以从不同角度深入探讨模式预报性能、偏差特征及关键影响因素。由图6a~b可见，24 h和1 h的PC评分分别为54%~88%和86%~97%。亚高海拔区、中海

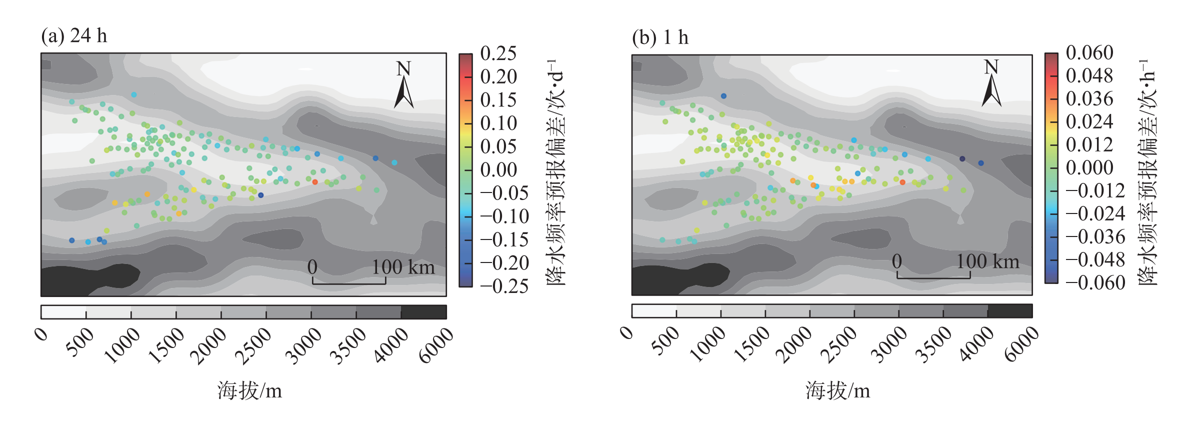
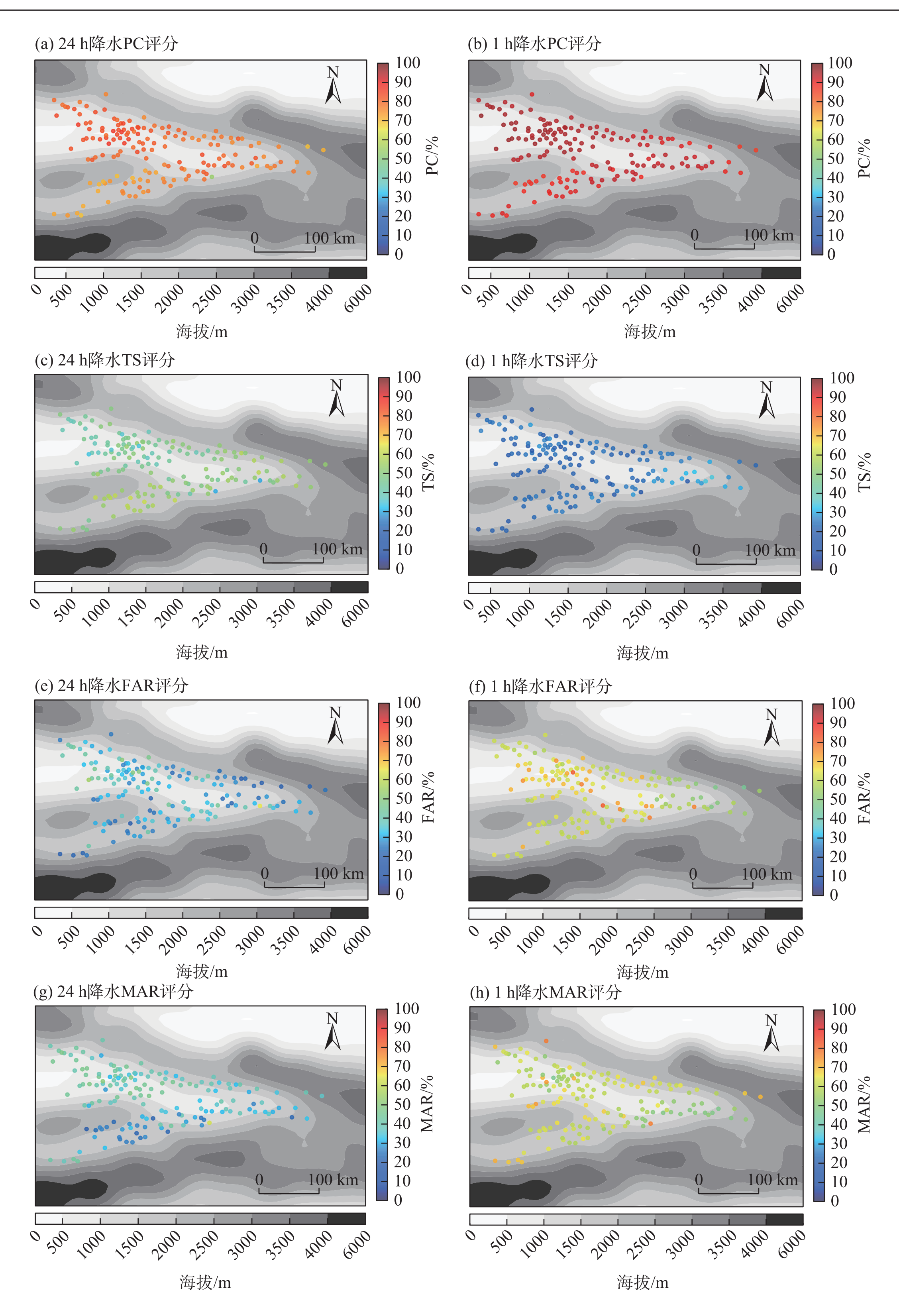


图5　降水频率预报偏差的空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of precipitation forecast frequency deviation



注:PC为用于反映预报准确率的评估指标。下同。

图6 降水预报评分空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of precipitation forecast scores

拔区和低海拔区测站24 h预报的PC评分为72%、77%和83%,1 h预报评分为88%、92%和95%,亚高海拔区评分最低,低海拔区评分最高。从图6c~d看,24 h和1 h的TS评分分别为30%~61%和13%~

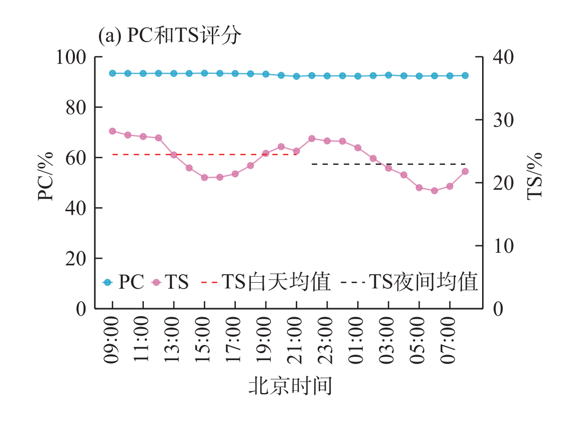
35%。亚高海拔区、中海拔区和低海拔区测站的24 h预报评分为55%、51%和46%，1 h预报评分为22%、24%和23%，评分高于30%的测站集中在河谷东部山区。以上结果表明，24 h和1 h预报的PC评分均随海拔增加呈下降趋势。PC评分高因为伊犁河谷的无降水频率远高于有效降水，且CMA-MESO模式对无降水的预报准确率远高于有降水。TS评分能更好反映有效降水预报准确率，24 h预报的TS评分随海拔增加而升高，而1 h预报的TS评分则与海拔变化关联不密切。从降水预报的FAR和MAR分布可知(图6e~h)，亚高海拔区、中海拔区和低海拔区测站的FAR分别为28%、30%和35%，MAR分别为30%、35%和39%，FAR和MAR均随海拔增高而降低，因此准确率提升；而1 h降水预报，亚高海拔区、中海拔区和低海拔区测站的FAR分别为59%、61%和65%，MAR分别为67%、61%和58%，FAR和MAR随海拔增高的变化趋势相反，导致预报准确率变化不明显。模式的24 h预报性能更优主要是因为预报时间尺度更大，使得24 h预报的空报率和漏报率均远低于1 h。而1 h降水预报中，亚高海拔区漏报率和低海拔区的空报率较多是导致了TS评分较低原因。

2.4　降水预报偏差日变化特征

降水的日变化在诸多气象要素中最显著[37]，其变化特征与CMA-MESO模式降水预报偏差有何特征？从图7a可以看出，CMA-MESO模式的降水预报评分呈不同的日变化特征。PC评分日变化差异微小，约92.2%~93.5%；而TS评分的昼夜变化差异显著。白天(09:00—20:00，下同)，最高TS评分出现在09:00，约28.2%，最低TS评分出现在15:00，约20.8%。夜间(21:00—次日08:00，下同)，最高TS评分出现在22:00，约27%；最低TS评分出现在06:00，约18.7%。此外，TS评分白天均值为24.5%，夜间均值为22.9%，白天的TS评分略高于夜间。

为何TS评分的日变化呈“W”型分布呢？从图7b可知，TS评分与降水观测频率的日变化分布十分近似。白天，降水频率均值为5.2%，最低频率出现在15:00为4.2%；夜间降水频率均值为6.3%，最低频率出现在06:00为5.8%，夜间的降水频率比白天多21.0%。对比降水预报与观测频率的偏差可知，白天预报偏差率主要为正偏差，最大偏差出现在中午13:00—14:00，预报偏差率超过40%。此外，降水预报频率在09:00—13:00呈上升趋势，而降水观测频率则呈下降趋势，导致白天降水空报次数较多。与白天的降水预报不同，夜间的降水预报偏差率以负偏差为主，最大负偏差出现在凌晨02:00—05:00，预报偏差率超过-12%，且夜间降水的漏报次数较多。

以上结果表明，CMA-MESO模式预报频率在模拟降水日变化特征的性能有待提升，特别是上午降水预报频率偏差最明显。该特征与WRF模式在四川盆地的预报偏差十分相似，这可能是因为模式过度模拟地表加热作用[38]，导致白天上升运动增强，降水预报偏多。对比图8可知，白天09:00—13:00气温快速上升，升温幅度为1.3~2 ℃·h^{-1}，导致相对湿度快速下降，下降幅度为3%·h^{-1}~6%·h^{-1}。同时，降水频率也随之下降。河谷昼夜温差明显，夜间地表辐射冷却导致相对湿度增大，并会促使辐射性降水的发生，模式对此过程模拟不足会导致降水预报频率偏少[39]。此外，伊犁河谷地形复杂，对地形强



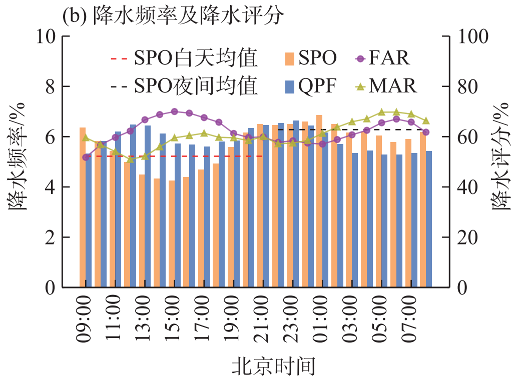


图7　小时降水频率及预报评分的日变化

Fig. 7　Diurnal variation of hourly precipitation observation frequency, forecast frequency and precipitation forecast scores

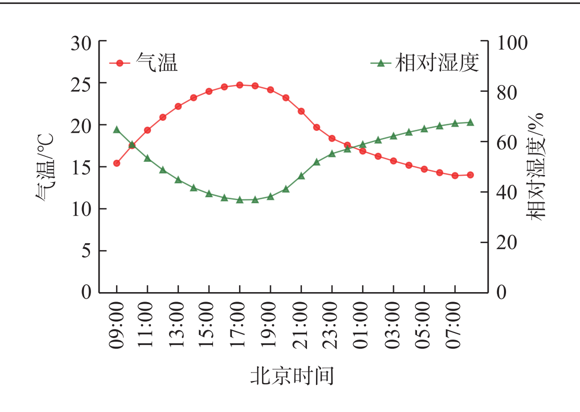


图8 小时气温和相对湿度的日变化

Fig. 8 Diurnal variation of hourly air temperature and relative humidity

迫效应模拟的偏差会显著影响对流性降水的发展和山谷风环流的强度，进而导致降水预报频率和强度的偏差。

3 讨 论

区域中尺度数值模式能够提供更高分辨率的预报，能更精细地捕捉到局部地区的气候特征[40]。CMA-MESO模式的预报性能具有显著的地方性差异。蔡怡等[41]评估了2021年夏季CMA-MESO模式降水预报后发现，川西复杂地形下的3 h降水预报频率与观测较接近，但降水量预报精准度偏低，降水预报峰值较观测过度偏早。陈昊明等[42]发现CMA-MESO模式在华南和华东的降水预报频率远高于观测，尤其是夜间的降水预报频率最为突出。而数值模式对云和对流表征的不准确是导致预报偏差的重要原因[43-44]。

以往的研究主要聚焦于CMA-MESO模式在我国季风区的降水预报性能评估，而在干旱地区的研究相对匮乏。本研究从多角度客观的评估了CMA-MESO模式在伊犁河谷暖季降水的预报性能，填补了该领域的研究空白。然而，新疆地域广阔，地形地貌复杂，地形对降水的影响机制尚未完全明确。未来研究应进一步探讨不同类型和尺度地形下的模式降水预报性能偏差，并结合数值模拟手段深入分析复杂地形对降水的影响机理。

此外，传统的降水预报业务检验方法虽然能够有效评估预报值与观测值在特定位置的匹配程度，但对小尺度偏差较为敏感，容易在高分辨率数值预报模式评估中产生“双重惩罚”问题。近年来，随着空间检验方法（如领域法等）的快速发展，其在评估高分辨率数值预报模式中的应用日益广泛。空间检验方法允许预报存在一定的空间偏差，更注重整体空间模式的匹配程度，并能提供直观的空间结构和分布特征信息。因此，未来研究可以结合传统检验与空间检验方法，从多维度全面揭示降水预报的偏差特征，进一步提升模式预报性能评估的科学性和实用性。

4 结 论

（1）伊犁河谷暖季降水频率随着降水强度的增大而骤降，CMA-MESO模式能较准确模拟出不同强度降水频率的变化。但24 h的强降水和1 h降水量≥2.0 mm的事件比例极低，导致预报难度极大，预报与观测的频率偏差率显著。

（2）CMA-MESO模式预报不同强度降水的TS评分与累积概率偏差密切相关。随着降水强度增强，1 h和24 h降水预报的TS评分均显著下降，但1 h降水预报偏差在0.1 mm达到峰值后逐渐下降，相比于24 h降水预报的累积偏差分布更简单，因此，更容易通过模式后处理技术来提升降水预报性能。

（3）CMA-MESO模式能较准确的描述降水频率随海拔的变化趋势。但随海拔的增高，降水预报的PC评分呈下降趋势，而TS评分呈上升趋势。具体表现为，24 h降水预报在不同海拔区域均为负偏差，而1 h降水预报在低海拔区为正偏差，亚高海拔区为负偏差。

（4）CMA-MESO模式难以准确描述伊犁河谷降水频率的日变化特征。模式预报频率偏差有显著的日变化特征，白天的降水预报以正偏差为主，而夜间的降水预报则以负偏差为主。降水预报的TS评分随降水观测频率变化，白天的TS评分略高于夜间。对比降水观测与预报的频率可以看出，清晨至午后的模式预报趋势与观测频率完全相反，偏差在中午13:00—14:00和凌晨02:00—05:00最显著。

参考文献（References）

[1] 杨霞, 安大维, 周鸿奎, 等. 2012—2017年伊犁河谷冬季降水日变化特征[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 609-619. [Yang Xia, An Dawei, Zhou Hongkui, et al. Daily variation of winter precipitation in Ili River Valley of Xinjiang from 2012 to 2017[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 609-619.]

[2] 隋露, 闫志明, 李开放, 等. 人类活动及气候变化影响下伊犁河谷生境质量预测研究[J]. 干旱区地理, 2024, 47(1): 104−116. [Sui Lu, Yan Zhiming, Li Kaifang, et al. Prediction of habitat quality in the Ili River Valley under the influence of human activities and climate change[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(1): 104−116.]

[3] 文广超, 赵梅娟, 谢洪波, 等. 伊犁河谷西部土地植被覆盖演化及驱动力分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 843−854. [Wen Guangchao, Zhao Meijuan, Xie Hongbo, et al. Analysis of land vegetation cover evolution and driving forces in the western part of the Ili River Valley[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 843−854.]

[4] 梁世川, 乔华, 吕东, 等. 伊犁谷地地质灾害分布特征及主控因素分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(6): 880−888. [Liang Shichuan, Qiao Hua, Lü Dong, et al. Distribution characteristics and main controlling factors of geohazards in Ili Valley[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(6): 880−888.]

[5] 曹小红, 孟和, 尚彦军, 等. 伊犁谷地黄土滑坡发育分布规律及成因[J]. 新疆地质, 2020, 38(3): 405−411. [Cao Xiaohong, Meng He, Shang Yanjun, et al. The development and distribution of loess landslides in Yili Valley and its causes[J]. Xinjiang Geology, 2020, 38(3): 405−411.]

[6] 赵良军, 李虎, 刘玉锋, 等. 新疆伊犁果子沟地质灾害风险评价及其致灾因子[J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 693−700. [Zhao Liangjun, Li Hu, Liu Yufeng, et al. Evaluation on geological hazard risk and disaster-causing factors in the Guozigou Valley in Ili, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(3): 693−700.]

[7] Deng H L, Chen Y N, Wang H M, et al. Climate change with elevation and its potential impact on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. Global & Planetary Change, 2015, 135 (12): 28−37.

[8] 张家宝, 邓子风. 新疆降水概论[M]. 北京: 气象出版社, 1987: 10−19. [Zhang Jiabao, Deng Zifeng. Introduction to precipitation in Xinjiang[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1987: 10−19.]

[9] Li L, Li J, Yu R C. Characteristics of summer regional rainfall events over Ili River Valley in northwest China[J]. Atmospheric Research, 2020, 243: 104996, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104996.

[10] Smith R B. The influence of mountains on the atmosphere[J]. Advances in Geophysics, 1979, 21: 87−230.

[11] 陈春艳, 王建捷, 唐冶, 等. 新疆夏季降水日变化特征[J]. 应用气象学报, 2017, 28(1): 72−85. [Chen Chunyan, Wang Jianjie, Tang Ye, et al. Diurnal variations of summer precipitation in Xinjiang [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(1): 72−85.]

[12] 郑永光, 张小玲, 周庆亮, 等. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J]. 气象, 2010, 36(7): 33−42. [Zheng Yongguang, Zhang Xiaoling, Zhou Qingliang, et al. Review on severe convective weather short-term forecasting and nowcasting[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(7): 33−42.]

[13] 黄丽萍, 邓莲堂, 王瑞春, 等. CMA-MESO关键技术集成及应用[J]. 应用气象学报, 2022, 33(6): 641−654. [Huang Liping, Deng Liantang, Wang Ruichun, et al. Key technologies of CMA-MESO and application to operational forecast[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2022, 33(6): 641−654.]

[14] 庄照荣, 江源, 田伟红, 等. CMA-MESO逐时快速更新同化预报系统及其短临预报效果初步分析[J]. 大气科学, 2023, 47(4): 925−942. [Zhuang Zhaorong, Jiang Yuan, Tian Weihong, et al. Hourly rapid updating assimilation forecast system of CMA-MESO and preliminary analysis of short-term forecasting effect[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2023, 47(4): 925−942.]

[15] Ma Z S, Liu Q J, Zhao C F, et al. Application and evaluation of an explicit prognostic cloud-cover scheme in GRAPES global forecast system[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2018, 10: 652−667.

[16] Liu K, Chen Q Y, Sun J. Modification of cumulus convection and planetary boundary layer schemes in the GRAPES global model[J]. Journal of Meteorological Research, 2015(5): 17, doi: 10.1007/s13351-015-5043-5.

[17] 曹勇, 包红军, 张恒德, 等. 基于快速滚动更新的无缝隙定量降水预报模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 303−308. [Cao Yong, Bao Hongjun, Zhang Hengde, et al. Seamless quantitative precipitation forecasting model based on rapid rolling update technique[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences Edition), 2021, 49(4): 303−308.]

[18] 王澄海. CMIP研究计划的进展及其在中国地区的检验和应用前景[J]. 地球科学进展, 2009, 24(5): 461−468. [Wang Chenghai. Evaluating the progress of the CMIP and its application prospect in China[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(5): 461−468.]

[19] 潘留杰, 张宏芳, 王建鹏. 数值天气预报检验方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(3): 327−335. [Pan Liujie, Zhang Hongfang, Wang Jianpeng. Progress on verification methods of numerical weather prediction[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(3): 327−335.]

[20] Gilleland E, Ahijevych D A, Brown G G. Intercomparison of spatial forecast verification methods[J]. Weather and Forecasting, 2009, 24(6): 1416−1429.

[21] 陈静, 刘凑华, 陈法敬, 等. 一种基于可预报性的暴雨预报评分新方法Ⅰ: 中国暴雨可预报性综合指数[J]. 气象学报, 2019, 77 (1): 15−27. [Chen Jing, Liu Couhua, Chen Fajing, et al. A new verification method for heavy rainfall forecast based on predictability Ⅰ: Synthetic predictability index of heavy rainfall in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2019, 77(1): 15−27.]

[22] 曹越, 赵琳娜, 巩远发, 等. ECMWF高分辨率模式降水预报能力评估与误差分析[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(3): 249−258. [Cao Yue, Zhao Linna, Gong Yuanfa, et al. Evaluation and error analysis of precipitation forecast capability of the ECMWF high-resolution model[J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, 38(3): 249−258.]

[23] 胡嘉缨, 董春卿, 操俊伟. 山西复杂地形下CMA-MESO 3 km系

统降水预报检验及订正[J]. 暴雨灾害, 2023, 42(4): 384-394. [Hu Jiaying, Dong Chunqing, Cao Junwei. Assessment and correction of precipitation forecast with the CMA-MESO 3 km model under the complex terrain in Shanxi Province[J]. Torrential Rain and Disasters, 2023, 42(4): 384-394.]

[24] 张武龙, 康岚, 周威, 等. 基于GRAPES-MESO模式的极端短时强降水预报[J]. 干旱气象, 2021, 39(3): 507-513. [Zhang Wulong, Kang Lan, Zhou Wei, et al. Extreme short-time heavy precipitation forecast based on GRAPES-MESO model[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(3): 507-513.]

[25] 李钰春, 喻琴昆, 何巍. 基于SAL方法对四川盆地一次区域性暴雨过程多模式预报空间检验[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(增刊2): 67-71. [Li Yuchun, Yu Qinkun, He Wei. Quantitative verification for multi-model forecast of a regional heavy rain process in Sichuan Basin based on SAL[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2022, 42(Suppl. 2): 67-71.]

[26] 李涛, 陈杰, 汪方, 等. 一种基于神经网络的中国区域夏季降水预测订正算法[J]. 干旱气象, 2022, 40(2): 308-316. [Li Tao, Chen Jie, Wang Fang, et al. A correction algorithm of summer precipitation prediction based on neural network in China[J]. Arid Meteorology, 2022, 40(2): 308-316.]

[27] 曹萍萍, 肖递祥, 龙柯吉, 等. 基于分位数映射法的四川省EC-MWF模式降水预报误差订正分析[J]. 干旱气象, 2023, 41(4): 666-675. [Cao Pingping, Xiao Dixiang, Long Keji, et al. Deviation correction of precipitation forecast by ECMWF model based on quantile mapping method in Sichuan Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2023, 41(4): 666-675.]

[28] 曾晓青, 汤浩, 张俊兰, 等. ECMWF的QPF短期预报性能在新疆的评估[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(4): 50-57. [Zeng Xiaoqing, Tang Hao, Zhang Junlan, et al. Forecast performance evaluation of QPF from ECMWF in Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2021, 15(4): 50-57.]

[29] 唐冶, 李如琦, 张萌, 等. DOGRAFS逐小时气温和降水预报的释用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(4): 100-106. [Tang Ye, Li Ruqi, Zhang Meng, et al. Study on the interpretation and application method of hourly temperature and precipitation forecast based on DOGRAFS[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2021, 15(4): 100-106.]

[30] 郑博华, 李斌, 黄秋霞, 等. 新疆伊犁河谷冷暖季降水时空分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 80-87. [Zheng Bohua, Li Bing, Huang Qiuxia, et al. Diurnal variation characteristics of precipitation in the cold and warm season of Ili River Valley, Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(3): 80-87.]

[31] 李炳元,潘保田,韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 535-543. [Li Bingyuan, Pan Baotian, Han Jiafu. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(4): 535-543.]

[32] 庄晓翠, 赵江伟, 李博渊, 等. 伊犁河谷暴雪过程水汽特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(2): 15-25. [Zhuang Xiaocui, Zhao Jiangwei, Li Boyuan, et al. Characteristics of water vapor during blizzard in Ili Valley[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2023, 17(2): 15-25.]

[33] 张家宝, 苏起元, 孙沈清, 等. 新疆短期天气预报指导手册[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1986. [Zhang Jiabao, Su Qiyuan, Sun Shenqing, et al. Guide handbook on Xinjiang short-term weather forecast[M]. Urumqi: Xinjiang People Press, 1986.]

[34] 秦贺, 陈春艳, 阿不力米提江·阿布力克木, 等. 新疆暖季短时强降水特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1440-1449. [Qin He, Chen Chunyan, Ablikim Ablimitijan, et al. Characteristics of short-duration heavy rainfall in warm season in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1440-1449.]

[35] 李勇, 梅双丽, 周宁芳. 1961—2020年西北地区夏季降水趋势变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2024, 18(1): 74-80. [Li Yong, Mei Shuangli, Zhou Ningfang. Variation characteristics of summer precipitation in northwest China from 1961 to 2020[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2024, 18(1): 74-80.]

[36] 谢漪云, 王建捷. GRAPES千米尺度模式在西南复杂地形区降水预报偏差与成因初探[J]. 气象学报, 2021, 79(5): 732-749. [Xie Yiyun, Wang Jianjie. Preliminary study on the deviation and cause of precipitation prediction of GRAPES kilometer scale model in southwest complex terrain area[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2021, 79(5): 732-749.]

[37] 汪小康, 崔春光, 刘柯, 等. 中国主雨季极端小时降水时空分布和日变化特征[J]. 气象, 2024, 50(4): 393-406. [Wang Xiaokang, Cui Chunguang, Liu Ke, et al. Spatio-temperal distribution and diurnal variation of extreme hourly precipitation in China during the main rainy season[J]. Meteorological Monthly, 2024, 50(4): 393-406.]

[38] 齐倩倩, 朱跃建, 陈静, 等. 基于GRAPES-GFS次季节预报的误差诊断和预报能力分析[J]. 大气科学, 2022, 46(2): 327-345. [Qi Qianqian, Zhu Yuejian, Chen Jing, et al. Error diagnosis and assessment of sub-seasonal forecast using GRAPES-GFS model[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 46(2): 327-345.]

[39] 许晨璐, 王建捷, 黄丽萍. 千米尺度分辨率下GRAPES-Meso4.0模式定量降水预报性能评估[J]. 气象学报, 2017, 75(6): 851-876. [Xu Chenlu, Wang Jianjie, Huang Liping. Evaluation on QPF of GRAPES-Meso4.0 model at convection-permitting resolution[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75(6): 851-876.]

[40] 刘东海, 黄静, 刘娟, 等. 典型中尺度数值预报模式参数化方案的综述与展望[J]. 地球科学进展, 2023, 38(4): 349-362. [Liu Donghai, Huang Jing, Liu Juan, et al. Review and prospect of parameterization schemes of typical mesoscale numerical prediction models at home and abroad[J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(4): 349-362.]

[41] 蔡怡, 徐枝芳, 龚玺, 等. 2021年夏季CMA-MESO模式降水预报评估[J]. 干旱气象, 2023, 41(3): 503-515. [Cai Yi, Xu Zhifang, Gong Xi, et al. Evaluation of precipitation forecast of CMA-MESO model in summer of 2021[J]. Journal of Arid Meteorology, 2023, 41

(3): 503-515.]

[42] 陈昊明, 李普曦, 赵妍. 千米尺度模式降水的检验评估进展及展望[J]. 气象科技进展, 2021, 11(3): 155-164. [Chen Haoming, Li Puxi, Zhao Yan. A review and outlook of verification and evaluation of precipitation forecast at convection-permitting resolution[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2021, 11(3): 155-164.]

[43] Jin Q, Yang X Q, Sun X G, et al. East Asian summer monsoon circulation structure controlled by feedback of condensational heating[J]. Climate Dynamics, 2013, 41(7-8): 1885-1897.

[44] Guo Z, Zhou T, Wang M, et al. Impact of cloud radiative heating on East Asian summer monsoon circulation[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(7): 074014, doi: 10.1088/1748-9326/10/7/074014.

Evaluation of hourly and daily precipitation forecasting performance of the CMA-MESO model in the warm season: A case of the Ili River Valley

MOU Huan[1], CHEN Chunyan[1], YANG Xia[1], ZHAO Li[2]

(1. Xinjiang Uygur Autonomous Region Meteorological Observatory, Urumqi 830000, Xinjiang, China;
2. Xinjiang Information Engineering School, Urumqi 830013, Xinjiang, China)

Abstract: The performance evaluation of quantitative precipitation forecasts can provide a scientific basis for the application and improvement of such forecasts. In this study, hourly site precipitation observation data and the CMA-MESO model's quantitative precipitation forecast data from May to September (the warm season) of 2022—2023. Using evaluation indicators such as the probability of correct rainfall, threat score (TS), false alarm ratio, and missed alarm ratio, precipitation forecast performance over the Ili River Valley was analyzed. The results revealed the following: (1) The CMA-MESO model can reasonably depict the 1 h and 24 h precipitation characteristics in the Ili River Valley during the warm season. As the precipitation intensity increases, both the forecast and observed frequencies of precipitation show a downward trend. (2) The TS for the CMA-MESO model forecast of precipitation of different intensities is closely related to the forecast bias of the accumulated precipitation probability. The 24 h precipitation forecast TS score for the range of 6.1-12.0 mm is the lowest, with the highest cumulative probability forecast bias, exceeding a mean of 2.0%. The 1 h forecast TS score significantly decreases with the enhancement of precipitation intensity, reaching a peak bias of 1.7% at 0.1 mm. (3) The frequency of the forecasted and observed precipitation shows an increasing trend with altitude. However, the 24 h forecast frequency exhibits a negative bias across all altitudes, while the 1 h forecast frequency shows a positive bias in the low-altitude areas and a negative bias in the sub-high-altitude areas. (4) In terms of diurnal variation, the CMA-MESO model did not accurately simulate the characteristic of low precipitation frequency during the day and higher frequency during the night in the Ili River Valley. Specifically, the model tends to have more false alarms for daytime precipitation and more missed alarms for nighttime precipitation. A comparison of the frequency of precipitation observations with forecasts shows that the pattern of the forecast trend from early morning to afternoon is completely opposite to the observed frequency; the most significant forecast biases occurs between 13:00—14:00 and 02:00—05:00.

Key words: CMA-MESO; evaluation of precipitation forecast; the warm season; hourly and daily precipitation; the Ili River Valley